III CONGRESO NACIONAL DEL AGUA

Desarrollo e Implementación de un Modelo Matemático para la Evaluación del Impacto Ambiental de la Intrusión Marina en el Acuífero del Río Caplina, Tacna-Perú

1. INTRODUCCIÓN

- Sobre explotación del acuífero del Caplina para el abastecimiento de la demanda de uso agrícola ha producido en los últimos años un incremento de la intrusión marina en el acuífero.
- Muestreos efectuados en el mes de junio del 2000 en pozos cercanos al litoral, indican que la evolución de la concentración salina desde el año 1997 al 2000 a tenido un ascenso, incrementándose entre 3 a 5 veces la concentración inicial.

1. INTRODUCCIÓN (Cont ..)

- Perforación de nuevos pozos de agua subterránea, un primer proyecto con un caudal de explotación de 100 l/s mediante 05 pozos localizados en el Asentamiento- Xl del valle de Caplina.
- Segundo proyecto igual al primero pero con un caudal incremental de 25 l/s.
- Para el análisis y control de la intrusión marina en el acuífero del Caplina, se desarrollo e implemento un modelo matemático para la simulación de la operación del acuífero empleándose la técnica de diferencias finitas con mallas asimétricas.

1. INTRODUCCIÓN (Cont…)

- Se elaboro un modelo en lenguaje Visual Basic V.6 y con enlace con el modelo Surfer V.8 para el tratamiento de los resultados.
- Se simulo la explotación del acuífero bajo la Hipótesis 1 (100 l/s) y Hipótesis 2 (25 l/s).
- Con los resultados de estas simulaciones se determinaron los niveles de intrusión marina en el acuífero del Caplina bajo condiciones de Ghyben-Herzberg.

2. HIPOTESIS

Desarrollo e implementación de un modelo matemático para el análisis y evaluación del problema de intrusión marina del acuífero del río Caplina por la implementación nuevos proyectos de irrigación a ser abastecidos por nuevos pozos de explotación de agua subterránea.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Metodología
3.1.1 Discretización del Área de Estudio
3.1.2 Desarrollo de Mallas Asimétricas
3.1.3 Método de Malla Poligonal

3.2 Información Utilizada

3.3 Desarrollo e implementación del modelo matemático del acuífero Caplina
3.3.1 Etapa de Desarrollo e Implementación del modelo
3.3.2 Etapa de Calibración
3.3.3 Etapa de Simulación

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Metodología

- Elección de discretizar asimétricamente (Poligonal) del medio acuífero es por la posición arbitraria de pozos de explotación dentro del ámbito del acuífero, y se logra resolver el problema de bordes irregulares del contorno acuífero contribuyendo con esto a una reducción del esfuerzo de cómputo.
- En base a la discretización asimétrica se desarrollará un modelo matemático que consta de dos partes: la primera que elabora las ecuaciones lineales para cada polígono y la segunda que resuelve el sistema total de ecuaciones

3.1 Metodología (Cont. ..)

- Para plantear el modelo propiamente dicho, se ha seguido el siguiente procedimiento:
  (i) Elección de la discretización del área del acuífero
  (ii) Método de solución a emplearse
  (iii) Estructura del modelo
  (iv) Calibración de parámetros del modelo en régimen transitorio.

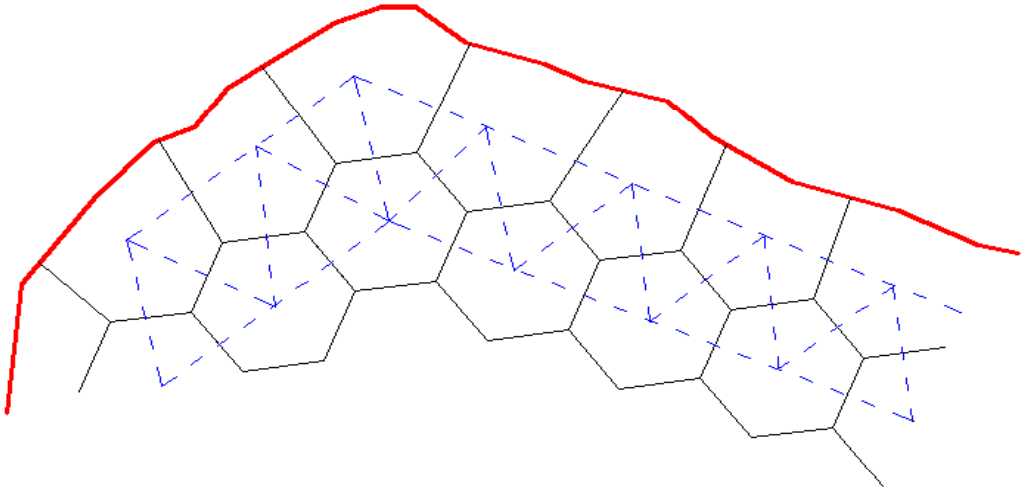
- La fase de utilización del modelo desarrollado es:
  (v) Simulación de hipótesis de explotación
  (vi) Determinación de la Interfase agua dulce – agua salada.

3.1.1 Discretización del Área de Estudio

Se realiza la discretización del medio acuífero en una serie de elementos asimétricos, (polígonos). Esta discretización está ligada a la elección del método de cálculo, el tipo de malla que se va a emplear y la dimensión de sus elementos con la finalidad de lograr un ajuste al contorno de área del acuífero.

3.1.2 Desarrollo de Mallas Asimétricas

La Figura muestra un dominio acuífero con una distribución arbitraria de pozos y con márgenes irregulares; subdividida en forma asimétrica por el empleo de polígonos y a cada pozo se le asigna un polígono.



3.1.2 Desarrollo de Mallas Asimétricas (Cont. ..)

Cada polígono está definido por el número de caras, la longitud de cara y el espesor del acuífero.

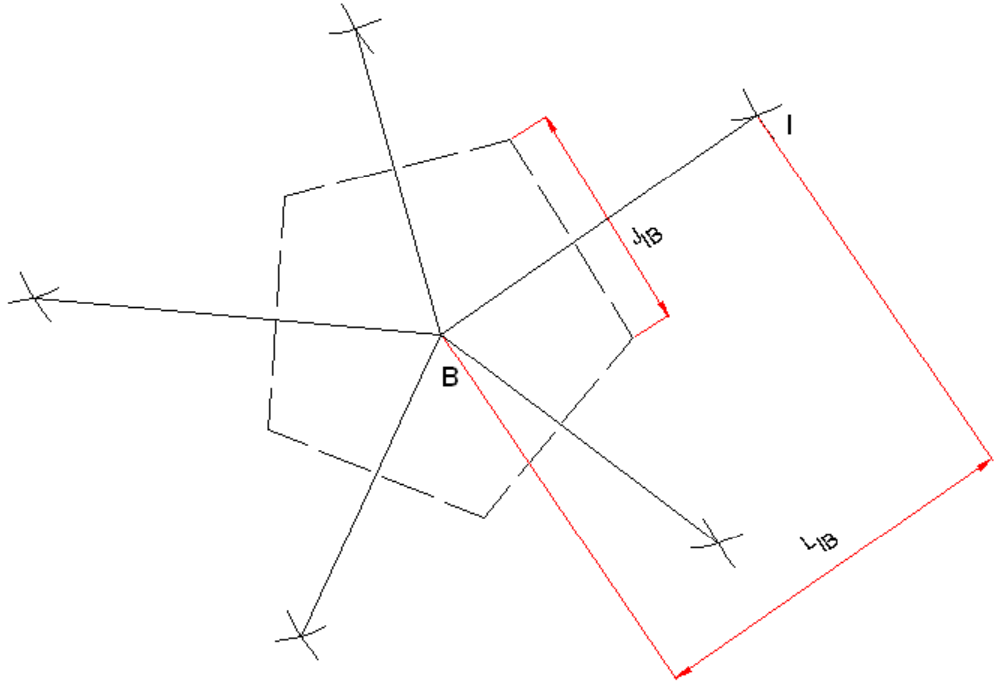


Figura 3.2: Nodo típico de una malla asimétrica

3.1.3 Método de Malla Poligonal

$$dV_P + dV_S = dV_T$$

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{h_l - h_B}{L_{lB}}$$

$$dV_P = \sum_{l=1}^{n} \frac{T_{lB} J_{lB}}{L_{lB}} \left(h_l - h_B \right)$$

$$dV_S = Q_B \Delta t$$

$$dV_S = \left(h_B - h'_B \right) S_B A_B$$

3.1.3 Método de Malla Poligonal (Cont. …)

$$Y_{lB} = \frac{J_{lB} K_{lB}}{L_{lB}}$$

$$\sum_{l=1}^{n} \left(h_l - h_B \right) Y_{lB} = A_B S_B \frac{\partial h_B}{\partial t} + A_B Q_B$$

$$Y_{lB} = \frac{J_{lB} K_{lB}}{L_{lB}} = \frac{J_{lB} T_{lB}}{L_{lB} b_B}$$

3.1.3 Método de Malla Poligonal (Cont. …)

h_l , h_B =	Niveles piezométricos de los polígonos l y B
A_B =	área asociada con el nodo A (polígono A)
Y_{lB} =	conductancia de la línea entre nodos l y B.
S_B =	valor del almacenamiento específico asociado con la zona poligonal centrado en B.
Q_B =	velocidad de flujo volumétrico por unidad de área en el nodo “B” (recarga ó bombeo).
K_{lB} =	valor del coeficiente de permeabilidad en el punto medio de los nodos l y B.
L_{lB} =	Distancia entre los nodos l y B (distancia entre centroides).
J_{lB} =	Longitud de la cara común a los dos polígonos, nodos l y B.
b_B =	espesor del acuífero en el nodo B.
T_{lB} =	Transmisividad de la cara común entre los nodos l y B.

3.1.3 Método de Malla Poligonal (Cont. …)

$$\sum_{l=1}^{n}\left(h_l^J - h_B^J\right)Y_{lB} = \frac{A_B S_B}{\Delta t}\left(h_B^J - h_B^{J-1}\right) + A_B Q_B$$

h_l , h_B = Niveles piezométricos de los polígonos l y B

A_B = área asociada con el nodo A (polígono A)

Y_{lB} = conductancia de la línea entre nodos l y B.

S_B = valor del almacenamiento específico asociado con la zona poligonal centrado en B.

Q_B = velocidad de flujo volumétrico por unidad de área en el nodo "B" (recarga ó bombeo).

K_{lB} = valor del coeficiente de permeabilidad en el punto medio de los nodos l y B.

L_{lB} = Distancia entre los nodos l y B (distancia entre centroides).

J_{lB} = Longitud de la cara común a los dos polígonos, nodos l y B.

b_B = espesor del acuífero en el nodo B.

T_{lB} = Transmisividad de la cara común entre los nodos l y B.

3.1.4 Interface agua Dulce – Agua Salada

La ubicación de la interface agua dulce-agua salada, que representa el problema de intrusión marina, se determina aplicando la condición de Ghyben - Herzberg, que se expresa por la relación siguiente:

$$h_s = 40\ h_f$$

dónde:

h_s = Profundidad a la cual se halla la interfase agua dulce-agua salada

h_f = Nivel del agua subterránea

40 = Valor deducido de las densidades de agua dulce y agua salada (Ghyben-Herzberg).

3.2 Información Utilizada

El Acuífero del Valle Caplina, está ubicado en el departamento de Tacna, entre $18^{0}20'$ de latitud y $70^{0}10'$ de longitud, la zona especifica comprende en general el cono deyectivo del río Caplina, sobre el cual se sitúan las Pampas de la Yarada y Hospicio, considerándose como límite del estudio la extensión entre la ciudad de Tacna, el litoral y los afloramientos rocosos que rodean el cono aluvial.

3.2 Información Utilizada (Cont. ..)

La información correspondiente a datos de piezometría histórica utilizada es para el acuífero superficial, básicamente la del año 2000, que sirvió como base para la etapa de calibración del modelo por ser la más consistente. Los valores de transmisividad son del orden de $1x10^{-2}$ a $5x10^{-2}$ y los de Coeficiente de Almacenamiento están en el rango de 0.3% a 6%.

3.2 Información Utilizada (Cont. ..)

La Hipótesis de explotación -1 a ser simulada en el período 2000-2004, comprende 100 l/seg. de sobreexplotación, con respecto a la explotación del año 2000, y corresponde al Asentamiento -X a operar en enero del 2002, mientras que la Hipótesis de explotación -2, consiste en explotar un caudal de 125 l/s, a implementarse en el Asentamiento –Y que entraría en operación en enero del 2003.

3.3 Desarrollo e implementación del modelo matemático del acuífero Caplina

3.3.1 Etapa de Desarrollo e Implementación del modelo

En esta etapa se desarrollo un programa en lenguaje Visual Basic para la implementación del modelo matemático de explotación de aguas subterránea del acuífero del Caplina, y luego se desarrollo una interfase con el programa Surfer para el tratamiento gráfico de los resultados del modelo, [5],[6],[7],[8] y [9].

3.3.2 Etapa de Calibración

En esta etapa se busca reproducir las piezometrías observadas históricamente, considerados como estado final del acuífero. El procedimiento seguido es el siguiente: a) Recopilación y análisis de la información, b) Selección del periodo de calibración, c) Límites del acuífero, d) Discretización espacial del acuífero, e) Configuración de la malla, f) Determinación de las propiedades hidrogeológicas, g) Flujos impuestos, h) Estado inicial del acuífero, i) Condiciones de frontera, [8], [9], [10]..

3.3.3 Etapa de Simulación

Una vez obtenida la confiabilidad del modelo en la etapa de calibración, este se utilizó para obtener los estados finales del acuífero sometido a los regímenes de explotación siguiente: (a) *Hipótesis de explotación No. 1:* El acuífero será sometido a una explotación de 100 l/s (05 pozos), y (b) *Hipótesis de explotación No. 2:* Explotación del acuífero en 125 l/s (06 pozos).

4. RESULTADOS Y DISCUCION

4.1 De la Etapa de desarrollo e Implementación del modelo

4.2 De la Discretización del Área de Estudio

4.3 De la Etapa de Calibración

4.4 Resultados de la Etapa de Simulación

4.5 De la Intrusión Marina

4.1 De la Etapa de desarrollo e Implementación del modelo

Se implemento un programa en lenguaje VISUAL BASIC 6.0 para la solución de la EC. (3.9) para el acuífero del Caplina, con almacenamiento de los resultados en tablas en EXCEL, para ser usados en el modelo SURFER V.8, para la visualización y analisis de los resultados en forma grafica.

4.1 De la Etapa de desarrollo e Implementación del modelo (Cont. ..)

El programa consta de 6 formularios, el primero que se refiere al ingreso al programa mismo y del segundo al cuarto formulario se visualiza las tablas de entrada de datos que previamente fueron llenados en la base de datos. El quinto formulario procede a realizar el cálculo de la piezometría del mes de estudio, es decir el proceso de calibración y poder comprobar la aproximación de los valores verdaderos con un error menor del 5%. Para finalizar el último formulario consta del cálculo anual de las piezometrías de los polígonos de cada uno de los meses, utilizándose el método de Gauss-Seidel.

4.1 De la Etapa de desarrollo e Implementación del modelo (Cont. ..)

Se elaboro el Manual de Usuario del modelo desarrollado, el cual permite una compresión rapida de la entrada de datos, procesos dentro del modelo, modo de almacenamiento de data y resultados, así como la presentación de los mismos.

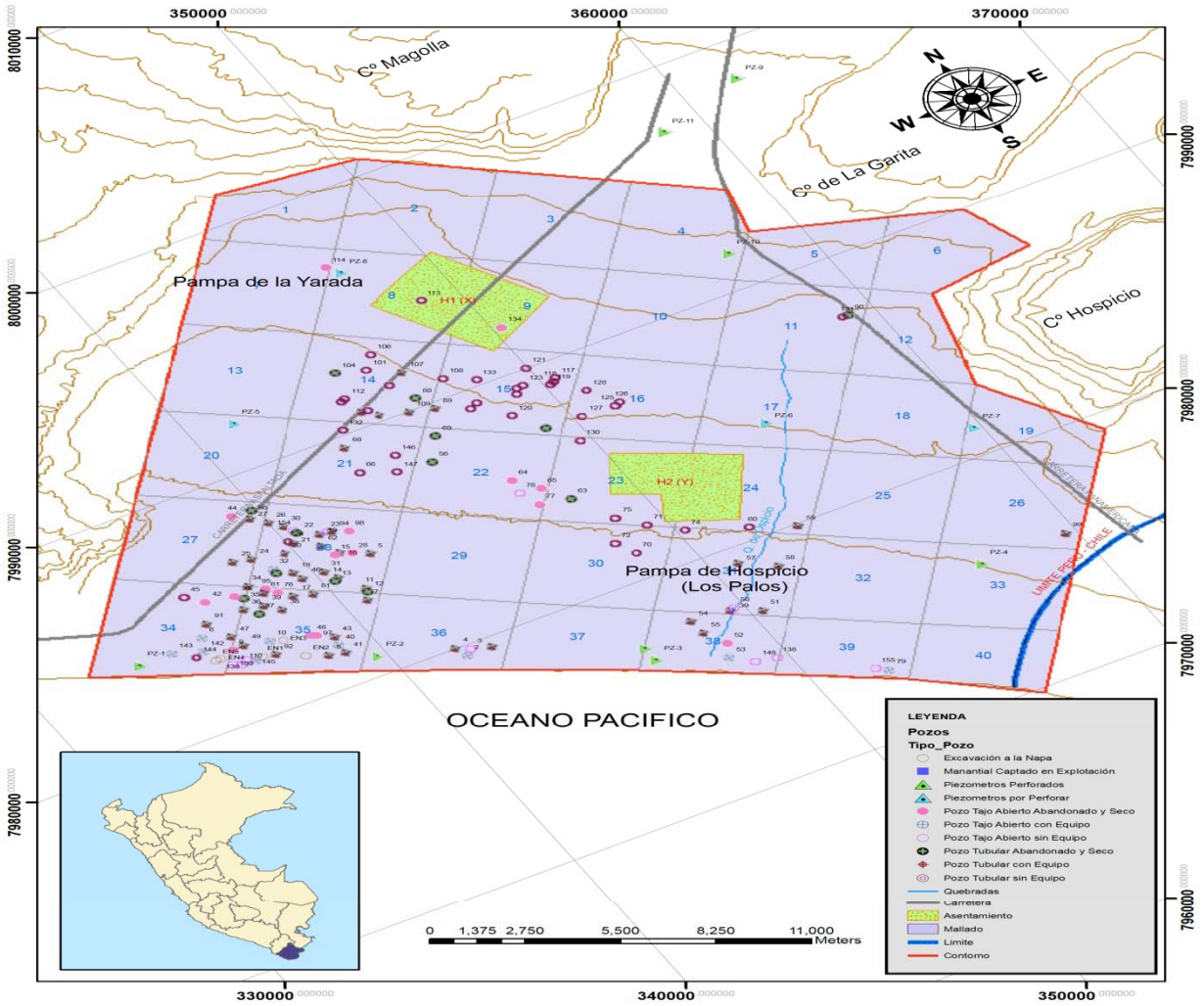
4.2 De la Discretización del Área de Estudio

Se discretizo el área de estudio del acuífero del Caplina, obteniéndose 40 polígonos, de los cuales 34 son polígonos de cuatro lados y 6 son de más lados, ver Figura 4.1. De este plano se han obtenido características de cada polígono como su número de caras, longitud de cada cara, longitud entre centroides de polígonos adyacentes, área del sector acuífero inscrito en el polígono, etc.

4.2 De la Discretización del Área de Estudio (Cont. ..)

Se discretizo el área de estudio del acuífero del Caplina, obteniéndose 40 polígonos, de los cuales 34 son polígonos de cuatro lados y 6 son de más lados, ver Figura 4.1. De este plano se han obtenido características de cada polígono como su número de caras, longitud de cada cara, longitud entre centroides de polígonos adyacentes, área del sector acuífero inscrito en el polígono, etc.

4.2 De la Discretización del Área de Estudio (Cont. ..)



4.3 De la Etapa de Calibración

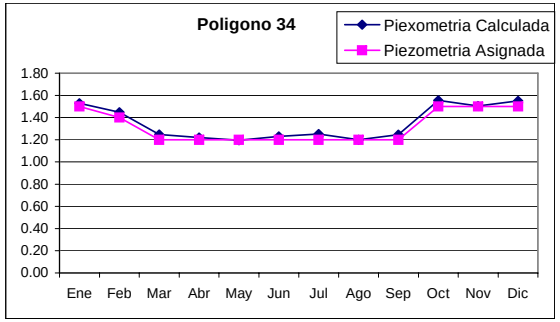
La etapa de calibración se divide en dos fases, la primera en la que se obtiene los datos de entrada al modelo y la segunda donde se ajustan ó verifican estos datos. Los datos necesarios de entrada al modelo son las características individuales de cada uno de los elementos de la discretización y el área acuífera que inscriben, los cuales serán a nivel mensual para el período de calibración, año 2000, información que se encuentra en la base de datos del modelo.

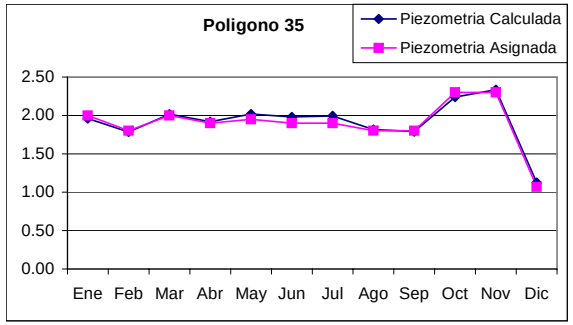
4.3 De la Etapa de Calibración (Cont. ..)

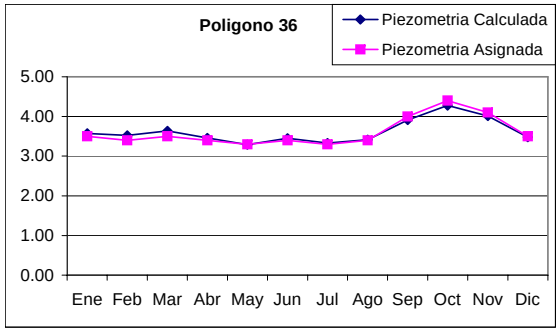
En la Figura 4.2, muestra los resultados de las etapas de calibración seguidas para período del mes de enero-1999 a diciembre 2000, observándose el valor de piezometría calculada por el modelo y la piezometría histórica registrada en el área de estudio.

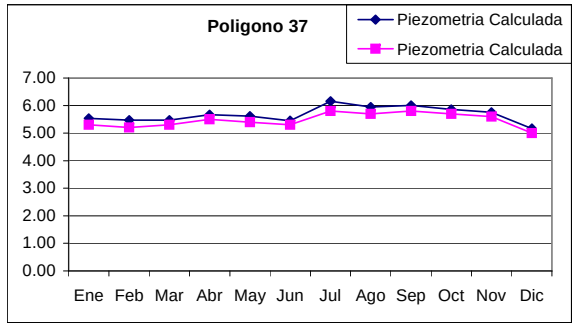
De la comparación de la piezometría calculada por el modelo y la histórica se aprecia el grado de calibración obtenida, que fue menor o igual al 5%. Analizando los resultados se obtiene una diferencia máxima de 0.05 m. en los polígonos 34 y 36 con lo cual se logró representar el sistema real con 3% de error.

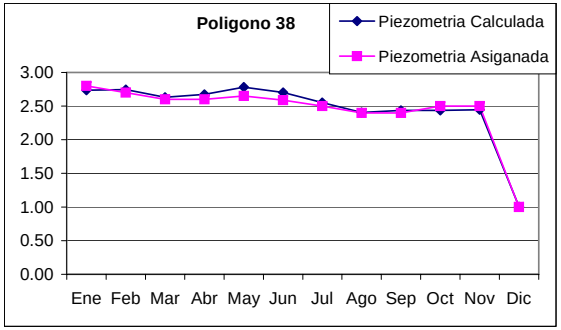
4.3 De la Etapa de Calibración (Cont. ..)

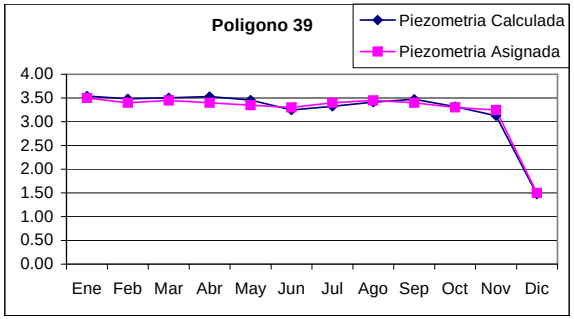












4.4 Resultados de la Etapa de Simulación

La simulación de las hipótesis de explotación, se realizaron en régimen transitorio utilizando el modelo desarrollado e implementado en la etapa de calibración, esto con la finalidad de conocer el riesgo de deprimir la napa hasta niveles peligrosos que conlleve a incrementar el fenómeno de intrusión marina en la parte litoral del valle Caplina en el período 2001-2004.

La Hipótesis de explotación -1 consiste en incrementar la explotación actual del año 2000, en 100 l/s que son los requerimientos del Asentamientos -X, a implementarse en enero 2002, que ha sido distribuido en las mallas No. 8 y 9. Calculándose la piezometría de las mallas que conforman la discretización del área de estudio, período 2001-2004.

4.4 Resultados de la Etapa de Simulación (Cont. …)

Para determinar la posición de la interfase agua dulce-agua salada se ha tomado como referencia el descenso piezométrico con relación a la piezometría de diciembre del 2000 en las mallas de las zona litoral del valle Caplina (ver Figura 4.1). El rango de variación de los abatimientos puntuales ocurridos en la zona litoral, para los polígonos 34 al 39 ubicados en la zona litoral son como mínimo de 0.64 m. y 0.89 m. como máximo, ocurriendo estos valores en los polígonos 36 y 37.

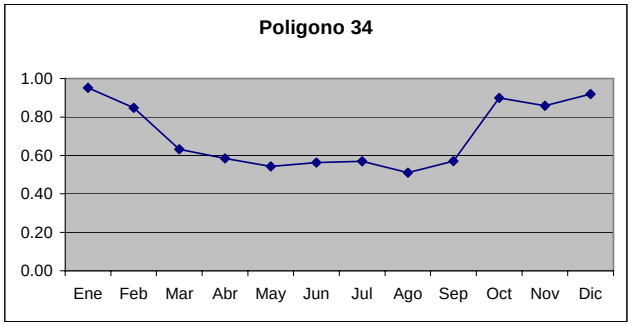
4.4 Resultados de la Etapa de Simulación (Cont. …)

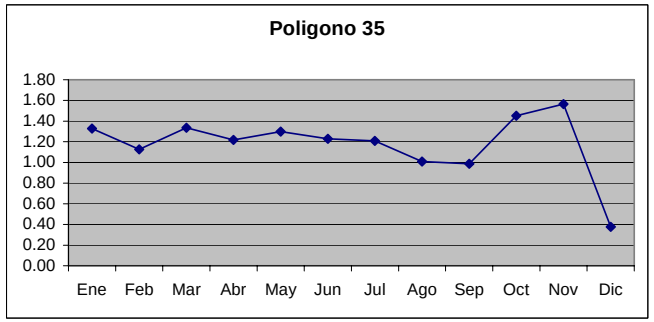
La Hipótesis de explotación -2, consiste en estudiar el comportamiento del acuífero sometido a una explotación adicional de 125 l/s, respecto a la explotación existente para 2000. Este incremento de caudal incluye el correspondiente a la Hipótesis -1, 100 l/s, y el caudal restante de 25 l/s, corresponde al incremento de explotación en el Asentamiento -Y, el cual será para enero 2003, y se distribuyó en la malla No. 23 y 24.

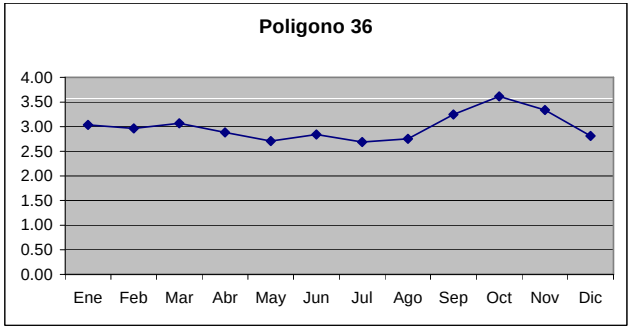
4.4 Resultados Etapa de Simulación (Cont. …)

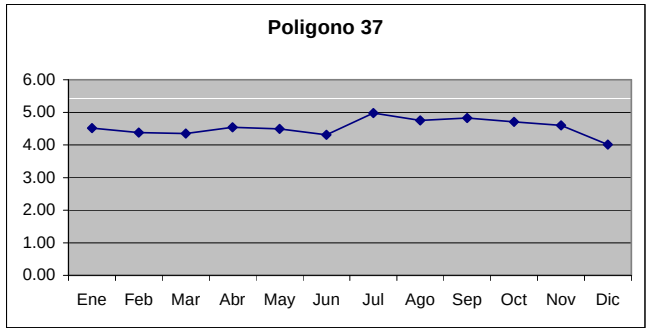
La Figura 4.3 muestra los diagramas piezométricos para las mallas de la zona litoral del valle Caplina, determinándose el rango de variación de los abatimientos puntuales para el período 2000-2004, ocurridos en la zona litoral, obteniéndose como mínimo de 0.23 m. y como máximo 5.1 m., ocurriendo estos valores en los polígonos 39 y 38.

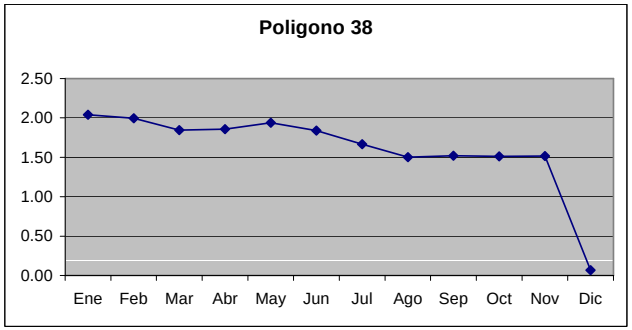
4.4 Resultados Etapa de Simulación (Cont. …)

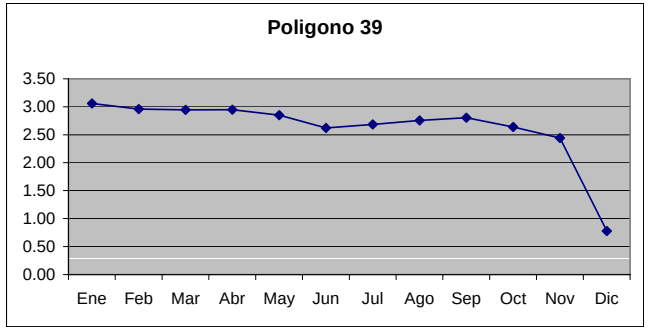












4.5 De la Intrusión Marina (Cont. ..)

Teniendo en cuenta la piezometría calculada por el modelo para cada hipótesis de explotación simulada h'_f, y considerando la Ec. (3.10) se obtendrá la nueva posición adoptada por la interfase para el período simulado, 2001-2004.

En el Cuadro 4.1, se presenta las variaciones puntuales de la interfase marina para la zona litoral del valle Caplina considerando la Hipótesis de explotación -1, observándose que, las variaciones son aceptables para las mallas que limitan con el litoral, mallas No. 34, 35, 36, 37, 38 y 39, por ser valores que no son peligrosos para la contaminación del acuífero, esto en relación a la posición puntual de la interfase marina con relación al nivel medio del mar.

4.5 De la Intrusión Marina (Cont. ..)

Poligono	34	35	36	37	38	39
Interfase Dic 2000	62.01	45.10	139.15	206.70	40.12	58.87
Interfase Dic 2004 H1	32.80	13.60	113.60	171.20	11.20	33.20
Variación	29.21	31.50	25.55	35.50	28.92	25.67

Cuadro 4.1: Variación puntual de la interfase marina, Período 2000-2004: Hipótesis de explotación-1

4.5 De la Intrusión Marina (Cont. …)

En lo que respecta a las variaciones puntuales ocasionados al entrar en ejecución la Hipótesis de explotación -2, se consideran demasiadas peligrosas, por estar muy cerca del nivel medio del mar, por considerarse que la posición de la interfase delimita una zona más o menos grande donde ocurren fenómenos de dispersión y difusión por lo cual la interfase estaría introduciéndose en el dominio del acuífero del Caplina, esto como consecuencia de un desequilibrio entre la explotación y la alimentación del acuífero, ver Cuadro 4.2.

4.5 De la Intrusión Marina

Poligono	34	35	36	37	38	39
Interfase Dic 2000	62.01	45.10	139.15	206.70	40.12	58.87
Interfase Dic 2004-H1Y-H2	36.77	15.06	112.44	160.58	2.74	31.04
diferencia	25.24	30.04	26.71	46.12	37.37	27.83

Cuadro 4.2: Variación puntual de la interfase marina, Período 2000-2004: Hipótesis de explotación -2

4.5 De la Intrusión Marina (Cont. ..)

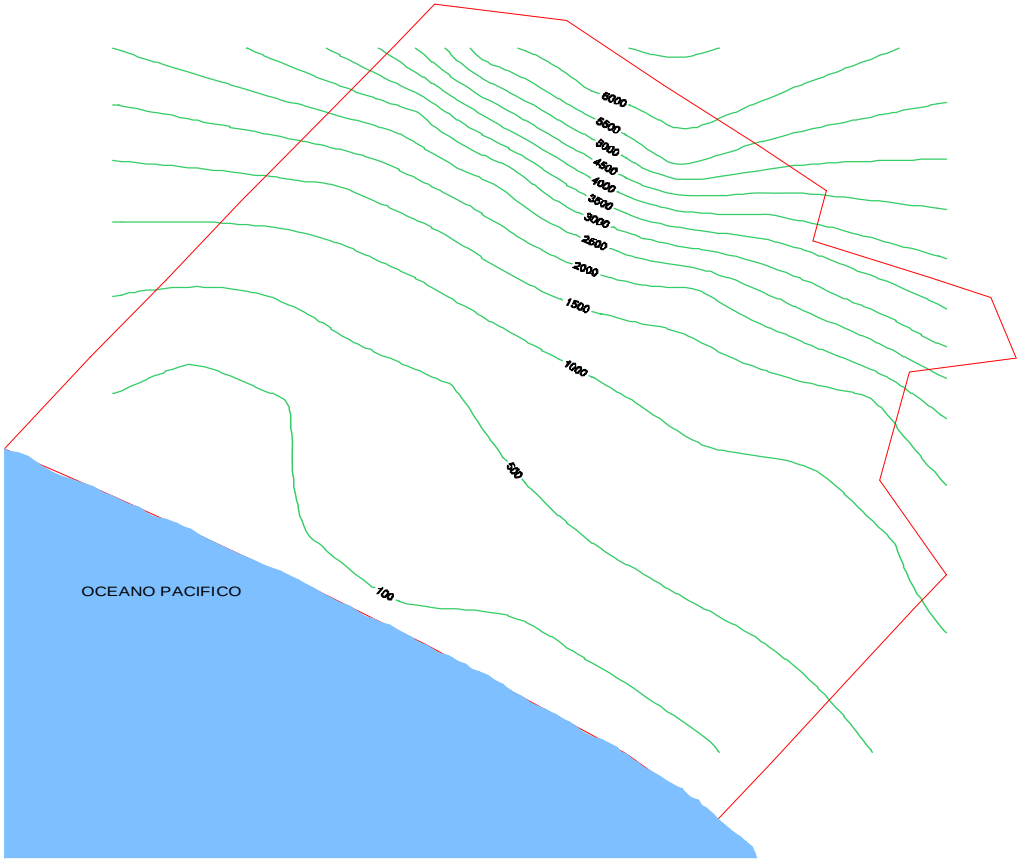


Figura 4.4: Posición de la Interfase Agua Dulce Agua Salada - Hipótesis de explotación -1, para periodo 2000 al 2004

5.0 CONCLUSIONES

a. Se desarrollo e implemento un modelo matematico para el análisis y la evaluación del impacto ambiental de la intrusión marina para el acuífero del Caplina, Tacna-Perú, utilizandose una discretización asimetrica y la tecnica de diferencias fínitas.

b. El modelo elaborado fue desarrollardo y programado en VISUAL BASIC V.6, que almacena los resultados en EXCEL, para luego ser utilizados por el modelo SURFER V.8 para su tratamiento gráfico.

c. El modelo cuenta con un Manual de Usuario, que permite un manejo facil del modelo por el usuario.

5.0 CONCLUSIONES (Cont. ..)

En la Etapa de calibración mensual del modelo, se logró reproducir el comportamiento del acuífero para el año 2000 con un 95% de aproximación; es decir con un 5% de error entre las piezometrías históricas y las obtenidas por el modelo.

La Hipótesis de explotación -1 simulada, período 2000-2004, que comprende 100 l/seg. de sobreexplotación, con respecto a la explotación del año 2000, da como resultados una variación de los abatimientos puntuales, siendo como mínimo de 0.64 m. y 0.89 m. como máximo, en los polígonos 36 y 37 de la zona litoral del valle Caplina. Mientras que la simulación de la Hipótesis de explotación -2, da como abatimientos mínimo de 0.23 m. y máximo de 5.1 m., localizados en los polígonos 39 y 38 de la zona litoral del valle.

5.0 CONCLUSIONES (Cont. ..)

Con respecto a la posición de la interfase agua dulce-agua salada, de los resultados obtenidos al simularse las Hipótesis de explotación 1 y 2, se determino que se debe implementar la Hipótesis de explotación -1 por no representar un peligro para la zona litoral del valle del Caplina.

6.0 RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar en modelo desarrollado e implementado para la evaluación del impacto ambiental de la intrusión marina en el acuífero del río Caplina, Tacna-Perú.

Se recomienda ejecutar la Hipótesis -1 bajo una adecuada política de explotación de la zona litoral del valle Caplina, tratando de no ocasionar una reducción significativa en la capacidad de captación de los pozos ya existentes en esta zona.

Se recomienda no incrementar la explotación en la zona litoral comprendida entre las mallas Nº 34 a la Nº 40, para no provocar descensos considerables del potencial piezométrico de agua dulce, que se sumaría a los provocados por la ejecución de la hipótesis recomendada.

7.0 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa de Iniciación Científica (PIC) dirigido por el Vicerrectorado Académico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación.

5.0 CONCLUSIONES

- El uso de la serie de caudales mensuales de quitaracsa pueblo, para evaluar la generación de potencia y energía del proyecto C.H. Quitaracsa 1, es considerar que ésta serie histórica se repetirá en el futuro tan igual como ha ocurrido en el pasado

-Considerar el uso de series sintéticas generadas con el modelo Thomas & Fiering a partir de la serie de caudales mensuales de Quitaracsa Pueblo, nos permite tener la posibilidad de tener en cuenta la ocurrencia de series de caudales equiprobables para analizar la performance del Proyecto C.H. Quitaracsa 1 bajo otro tipo de escenarios como el húmedo, seco y promedio.

-Los caudales promedio multianuales de las series sintéticas se ajustan a una distribución normal.

- Se recomienda generar un mayor número de series sintéticas para tener una mayor población de posibles futuros eventos equiprobables de ocurrir en el futuro.

III CONGRESO NACIONAL DEL AGUA

Desarrollo e Implementación de un Modelo Matemático para la Evaluación del Impacto Ambiental de la Intrusión Marina en el Acuífero del Río Caplina, Tacna-Perú

MUCHAS GRACIAS